

UN MIX ÉLECTRIQUE  
100% RENOUVELABLE ?



ANALYSES ET OPTIMISATIONS

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

David MARCHAL, Directeur Adjoint Productions et Énergies Durables  
Conférence Fondation Tück  
23 mai 2016

- **EPIC sous tutelle des Ministères**

- *Écologie, développement durable et Énergie*
- *Enseignement supérieur et recherche*

- **Domaines d'activité:**

- *Prévention des Déchets*
- *Transport et mobilité*
- *Ville durable (air, bruit)*
- *Énergie et climat*
- *Efficacité énergétique*

- **Budget:**

- *590 M€, en 2014*
- *3 300 M€, au titre des investissements d'avenir*



PARIS2015  
 UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE  
 COP21-CMP11



- **Nos Missions**

- *Accélérer le déploiement de la transition énergétique et écologique*
- *Innover & préparer l'avenir de la TEE*
- *Contribuer à l'expertise collective pour la TEE*

- **Combien, où ?**

- *Environ 1000 employés*
- *Siège (Angers, Paris, Sophia Antipolis)*
- *17 Directions régionales*

*« Un travail d'exploration des limites du développement des énergies renouvelables dans le mix électrique métropolitain à un horizon 2050 »*

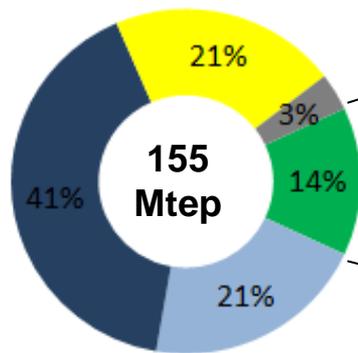
- 1. Contexte et objectifs de l'étude**
- 2. Méthode et hypothèses**
- 3. Résultats**



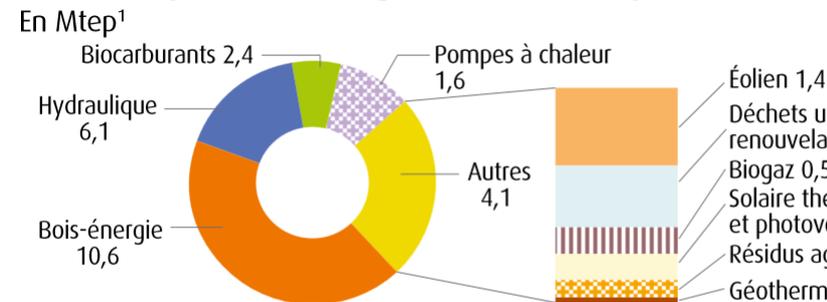
- Il s'agit d'une photographie d'un parc optimal à un horizon lointain (2050), pas d'un scénario. Pas de prise en compte de la temporalité des investissements.
- **Equilibre offre-demande réalisé au pas horaire:** pas d'analyse de la stabilité du réseau au niveau infra-horaire.

## 1. Les EnR représentent aujourd'hui environ 14% de la consommation finale d'énergie en France

Répartition des différentes énergies dans la consommation finale en France (2013)



Production primaire d'énergies renouvelables par filière : 24,4 Mtep<sup>1</sup>



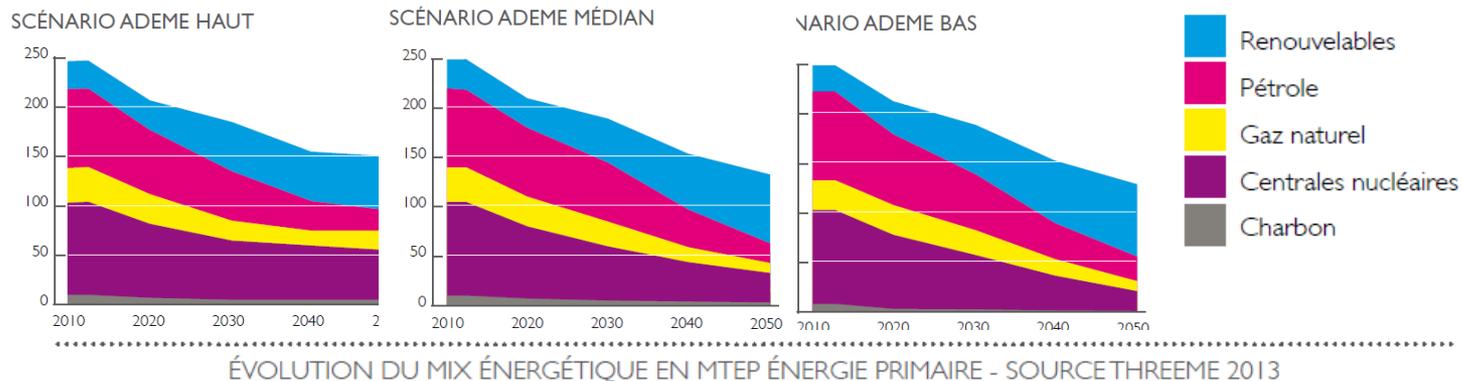
<sup>1</sup> Voir « Méthodologie – définitions » p. 43 \* Voir définition p. 46  
 Champ : métropole.

Source : SOeS, d'après

## 2. Les deux ressources majeures actuellement: le bois énergie et l'hydro-électricité

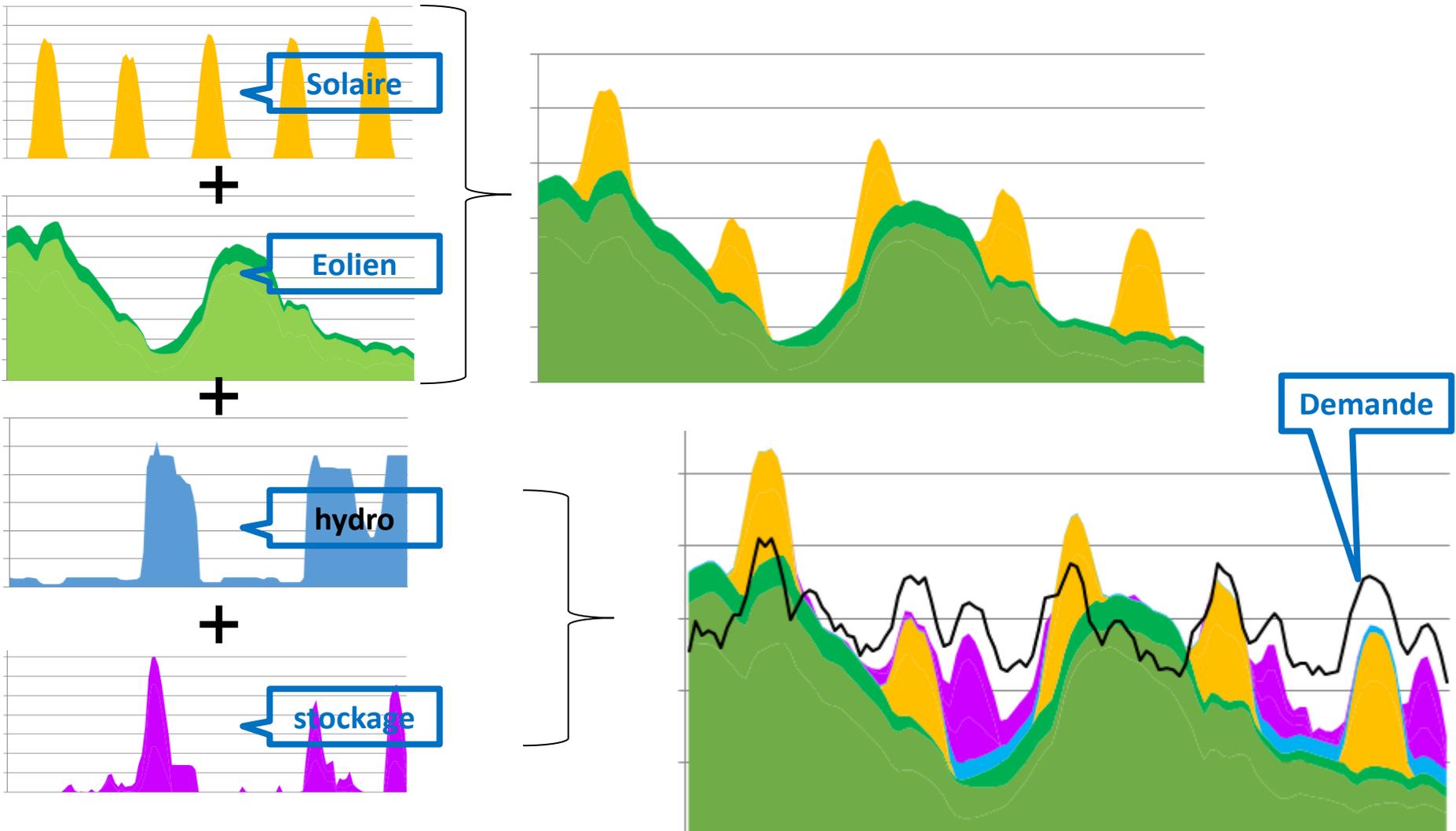
## 3. Pour l'électricité: les EnR représentent en 2014 environ 20% de la consommation

- **Les « Visions énergie 2030-2050 »**
  - Compatibles avec objectifs LTECV
  - Facteur 4 sur le CO<sub>2</sub> en 2050
  - Division par 2 de la conso en 2050
- **Sur l'électricité, 3 scénarios énergétiques retenus:**
  - Haut: 50% de nucléaire
  - Médian: 25% de nucléaire
  - Bas: 18% de nucléaire



- **Une étude « 100% EnR électrique » pour approfondir**

## Comment palier à la variabilité de la production EnR ?

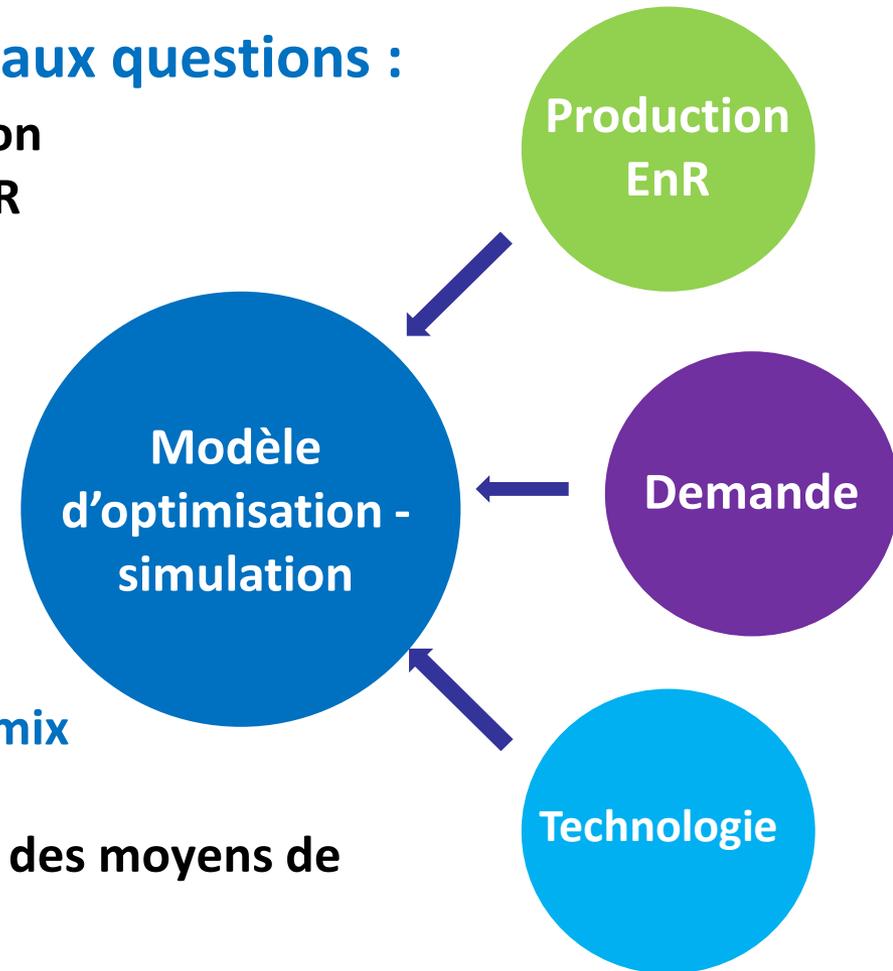


### L'étude a pour objectifs de répondre aux questions :

- Quelles contraintes apparaissent lorsqu'on augmente de manière importante les ENR dans le mix **électrique renouvelable** en France métropolitaine ?

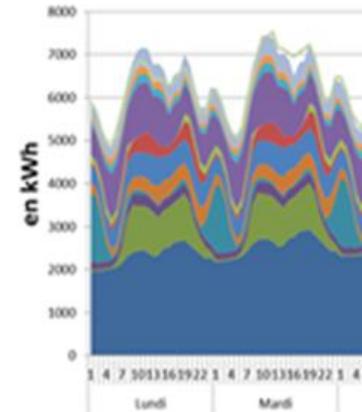
=> On se place :

- dans l'hypothèse extrême d'un mix 100% renouvelable
- à un horizon de temps éloigné (pas de considération de trajectoire)
- Sous ces hypothèses, quel serait le/(les) **mix électrique optimal** ?
- Quelle serait la **répartition géographique** des moyens de production ?
- Quels **impacts économiques** d'un tel mix ?

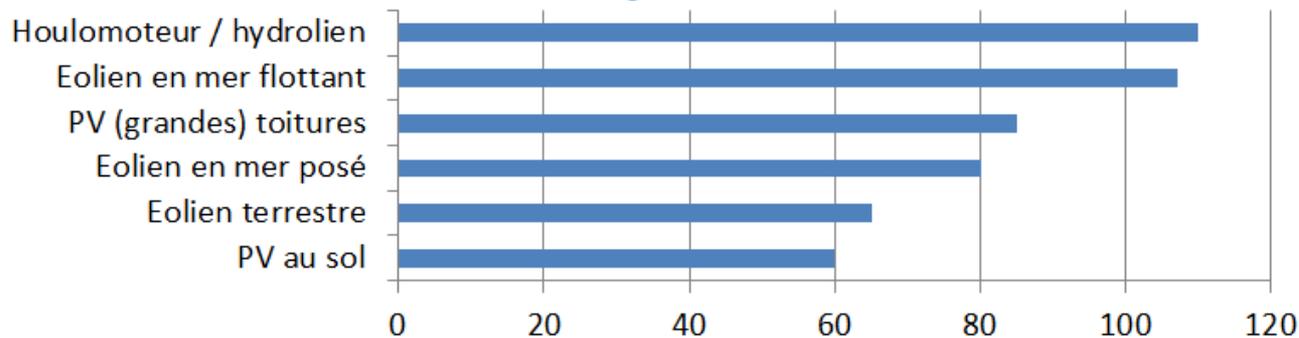


→ Etude à vocation technique et scientifique

- **La demande** [ 420 TWh; pointe de 96 GW ]
  - Un niveau de demande en baisse, mais de nouveaux usages couverts, et une structure en forte évolution
  - Des hypothèses fortes de flexibilité de la demande
  - Une reconstitution des chroniques par usages
- **Les gisements EnR** [ Énergie disponible = 1250 TWh ]
  - Estimation des gisements via approche cartographique
  - Des gisements renouvelables disponibles abondants
  - Une quinzaine de filières EnR modélisées
- **Les coûts des technologies**



<b>PV</b>	47 GW sol et 364 GW toit
<b>Eolien</b>	172 GW et 66 GW en mer



■ LCOE (€/MWh)

## Plusieurs variantes et analyses de sensibilités autour d'un cas de référence

		Pénétration EnR	40%	80%	95%	100%
<b>Cas de référence</b>			✓	✓	✓	✓
<b>Variantes « acceptabilité / comportement »</b>	Renforcement du <b>réseau plus difficile</b>					✓
	<b>Consommation plus élevée</b>					✓
	<b>Acceptabilité modérée</b> de l'éolien et PV sol			✓		✓
	<b>Acceptabilité restreinte</b> de l'éolien et PV sol					✓
	Coûts techno élevés et acceptabilité restreinte		✓			
<b>Variantes « économie »</b>	Coûts technologiques <b>plus élevés</b>					✓
	Coûts technologiques <b>plus faibles</b>					✓
	<b>Taux d'actualisation</b> plus faible					✓
<b>Variantes « Contrastes »</b>	Année sèche					✓
	Sans photovoltaïque					✓
	Sans éolien de Nouvelle Génération					✓
	Sans flexibilité dynamique de la demande					✓
	Prise en compte du réseau de répartition	✓				✓

### 1. Plusieurs mix électriques permettent d'assurer l'équilibre horaire à 100% EnR, selon différentes contraintes

- Toujours majoritairement basés sur le PV et l'éolien
- Mix testés sur 7 années météo, au niveau européen

### 2. Le coût de l'électricité produite dépend peu du taux d'EnR,

- Mais surtout de la MDE, de l'acceptabilité et des progrès technologiques.
- Une part non-EnR dans le mix le rend plus résilient à ces facteurs.

### 3. La flexibilité et le stockage sont indispensables

- La flexibilité de la demande complète la variabilité journalière des EnR
- Différentes répartition des types de stockage selon les contraintes

### 4. La complémentarité entre filières EnR est essentielle

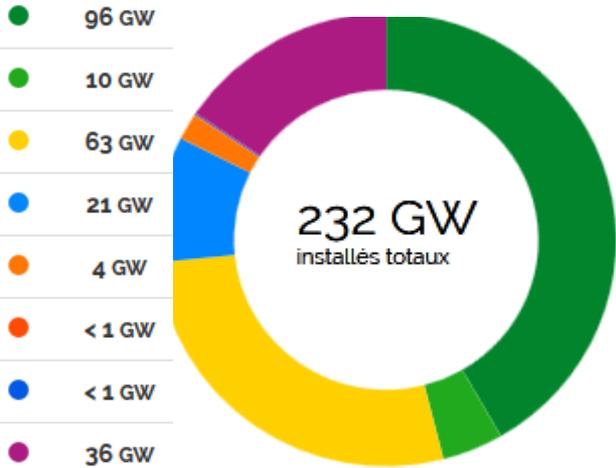
- L'optimum économique repose sur un équilibre entre LCOE et service rendu au système

### 5. Le développement du réseau inter-régional est nécessaire pour mutualiser les potentiels

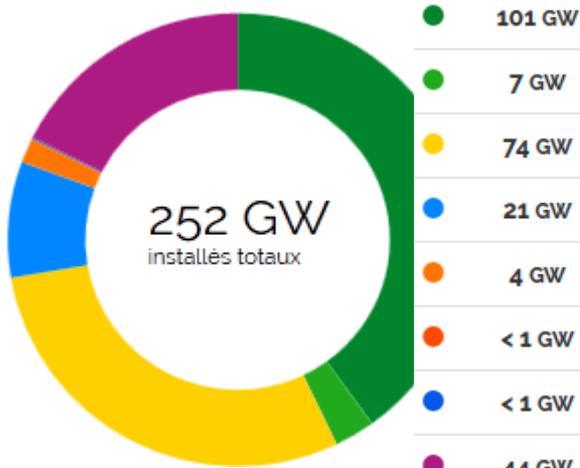
- + 36% de capacité de réseau inter-régional

**Selon les contraintes,  
 plusieurs mix optimaux  
 sont identifiés.  
 PV et éolien en sont les  
 2 piliers.**

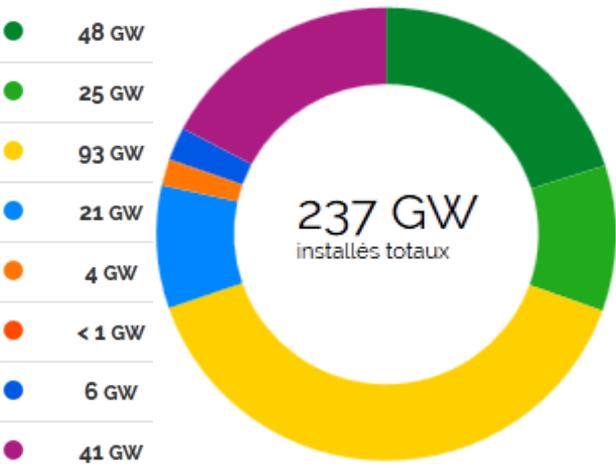
**Scénario central**



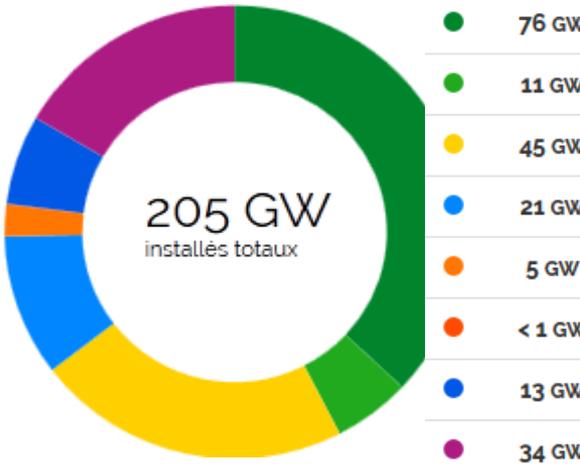
**Coût de réseau élevé**



**Acceptabilité modérée**



**Technologies émergentes accessibles**



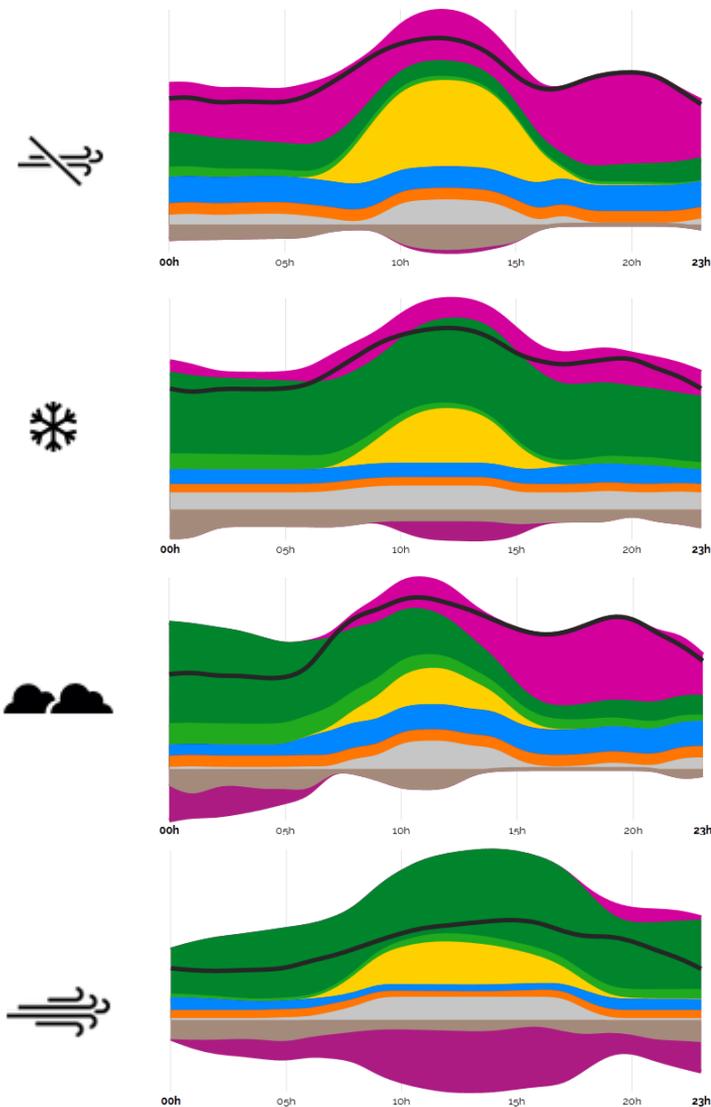
- Éolien terrestre
- Éolien en mer
- Solaire photovoltaïque
- Hydraulique
- Biomasse
- Géothermie
- Énergie marines renouvelables
- Stockage

**Résultat 1**

**Plusieurs mix électriques 100% EnR**

**Les mix 100% EnR sont robustes face aux aléas météorologiques :**

- **Atouts méthodologiques :**
  - Productions éoliennes et solaires cohérentes au niveau France et au niveau européen
  - Mix étrangers 80% EnR
  - La demande France est corrélée à la température
- **Le mix retenu « fonctionne » sans défaillance pour 7 années météorologiques : juin 2006 à mai 2013**
- **Une variante « année sèche » également réalisée**

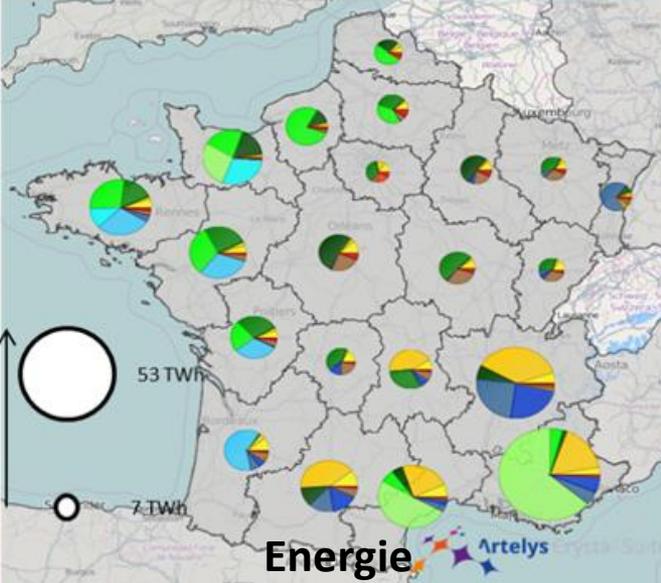
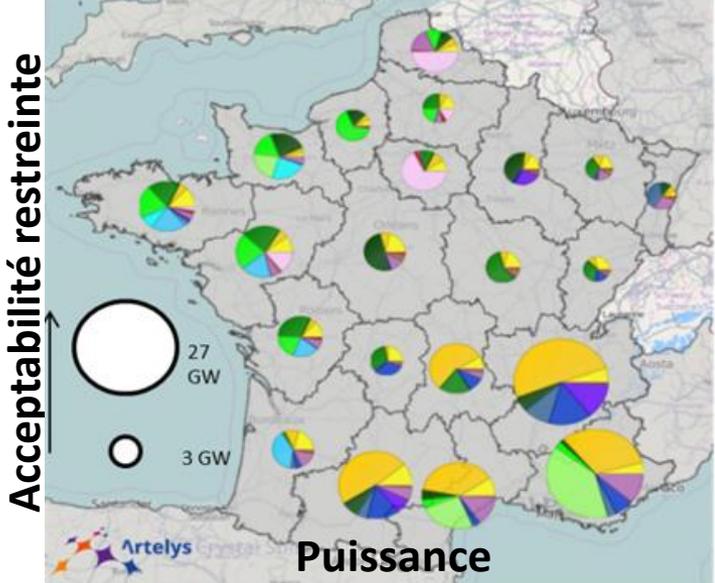
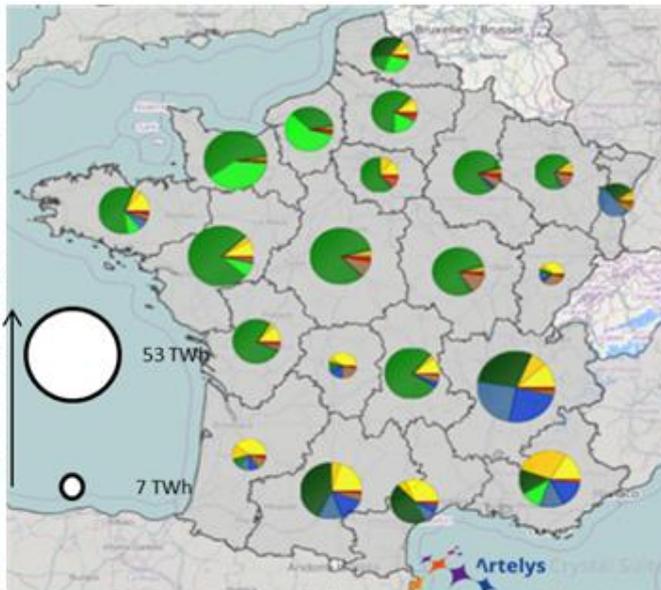
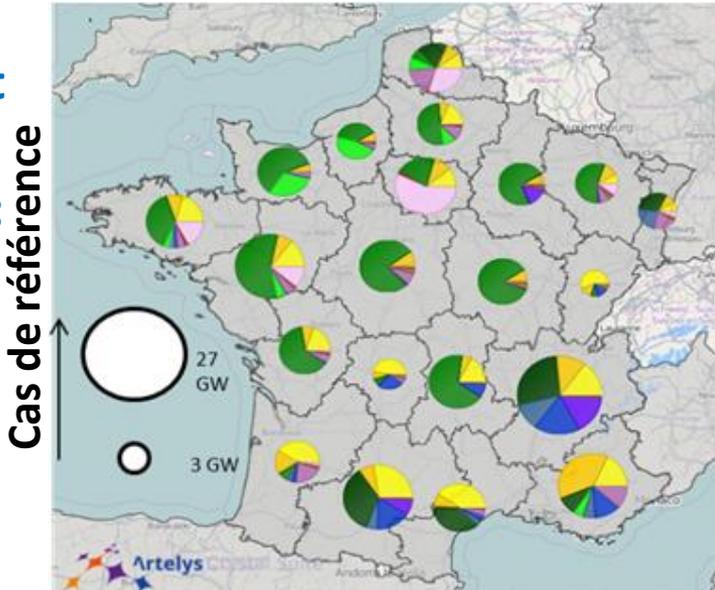


**Résultat 1**

**Plusieurs mix électriques 100% EnR**

Des mix régionaux dont les gisements retenus dépendent :

- du LCOE
- du coût de réseau
- du profil de production

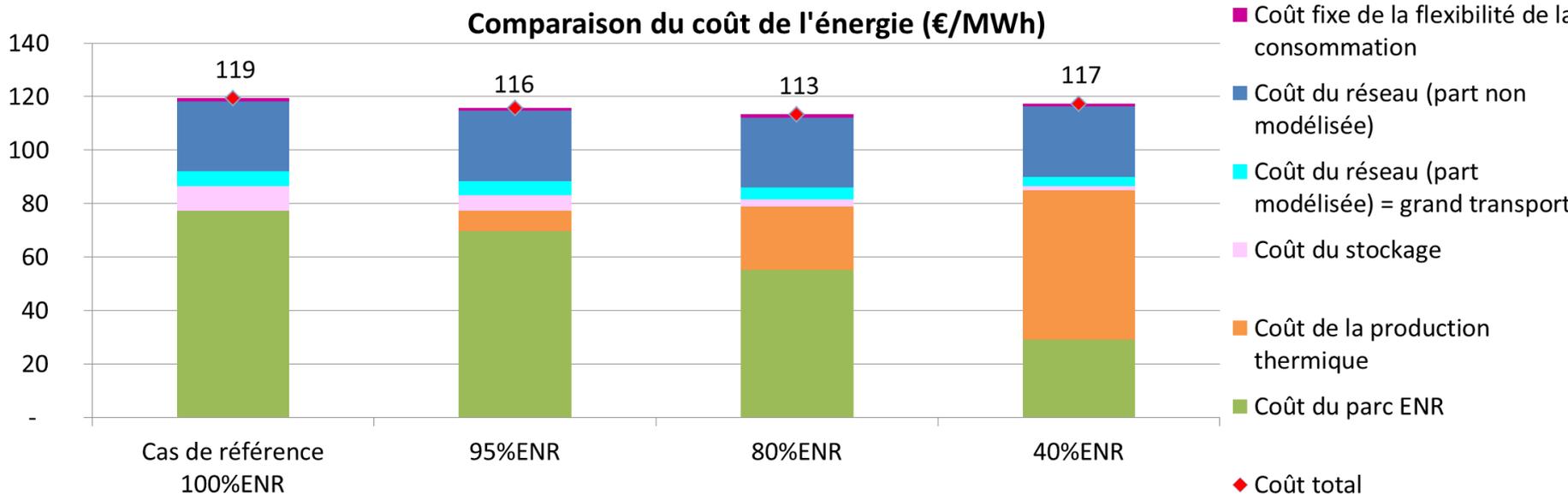
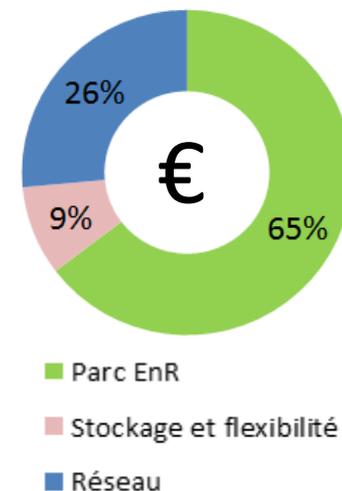


- Hydrolienne
- Houlomoteur
- Marée-motrice
- Fil de l'eau
- Lacs et éclusées
- STEP
- Cogénération bois
- UIOM
- Méthanisation
- Géothermie
- PV au sol
- PV sur toitures
- CSP
- Eolien terrestre AG
- Eolien terrestre NG
- Eolien en mer
- Eolien en mer flottai
- Gaz de synthèse
- CAES

**Résultat 2**

**Les déterminants du coût: MDE, progrès techno, et acceptabilité**

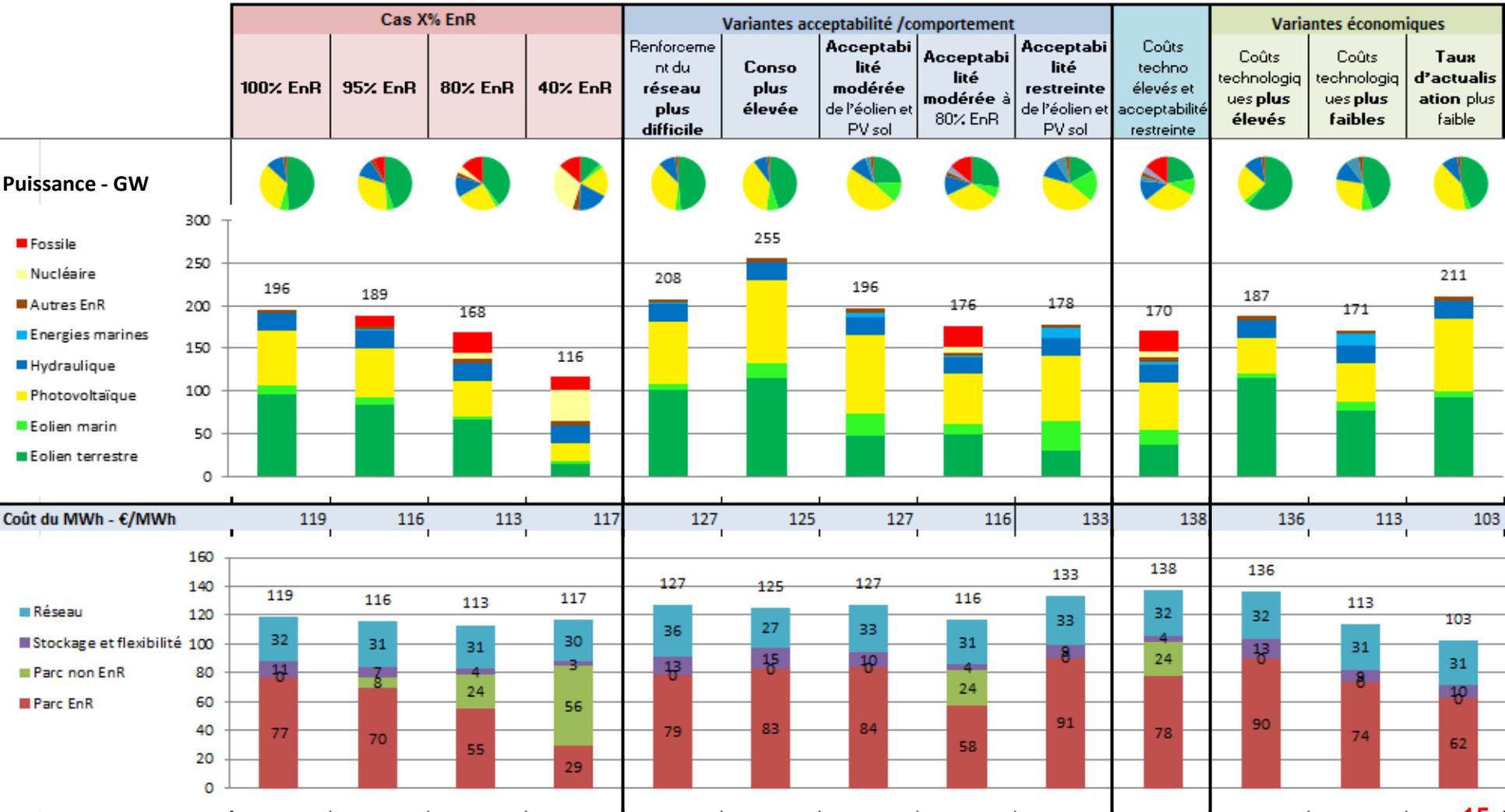
- Un coût de l'électricité d'environ 120€/MWh
- L'essentiel des coûts provient de l'investissement dans les moyens de production EnR
- Les coûts dépendent peu du taux d'EnR, selon les hypothèses retenues:
  - Un surcoût du mix 100% EnR de seulement 2% par rapport à un mix électrique 40% EnR



# Résultat 2

## Les déterminants du coût: MDE, progrès techno, et acceptabilité

- Bilan des principales variantes : 103 €/MWh → 138€/MWh

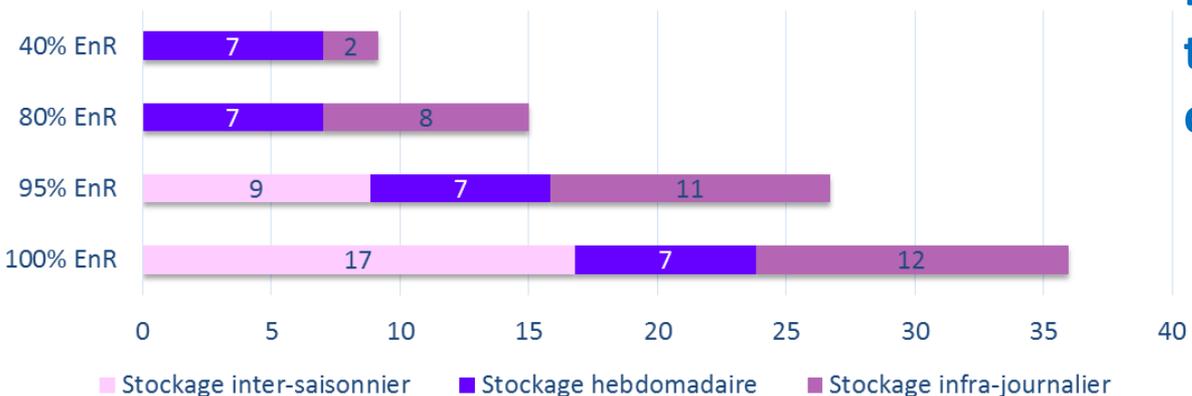


## Différents types de flexibilité pour différents horizons temporels

- **3 technologies de stockage en plus du pilotage de la demande**
- **Le stockage inter-saisonnier représente 19 TWh, soit 4% de la production annuelle**
- **Flexibilité dynamique de la demande et stockage infra-journalier rendent les mêmes services au système**

Pilotage de la demande	-8 / +22 GW
Stockage court terme (6 heures)	12 GW
Stockage hebdo - STEP (30 heures)	7 GW
Stockage inter-saisonnier - P2G2P	17 GW

Stockage installé (GW) en fonction du taux d'EnR



- **La part relative des différents types de stockage dépend des contraintes de mix**
  - Le stockage intersaisonnier disparaît sous 95% EnR
  - Le stockage journalier croît avec la part du PV

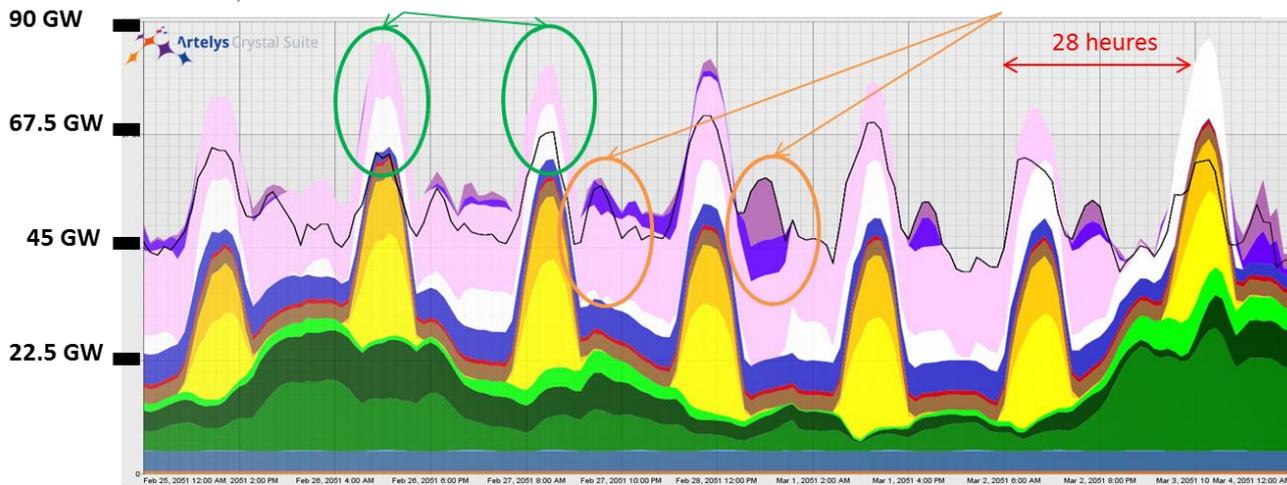
**Résultat 3**

**Flexibilité et stockage sont indispensables**

**Exemple des périodes sans vent: 24/02 au 3/03**

Déstockage inter-saisonnier le jour pour remplir les stocks de plus court-terme

Utilisation de tous les stockages pour satisfaire la pointe de consommation nocturne

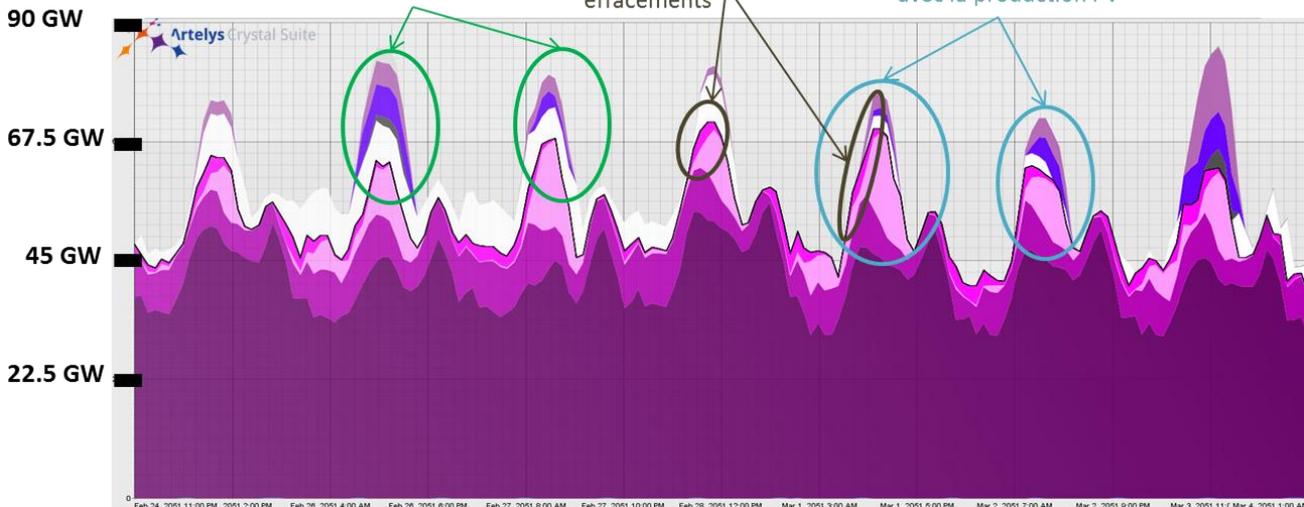


- UIOM
- Géothermie
- Fil de l'eau
- Marée-motrice
- Eolien terrestre NG
- Eolien terrestre AG
- Eolien en mer
- PV au sol
- PV sur toitures
- CSP
- Cogénération bois
- Cogénération méthanisation
- Lacs et éclusées
- Demande
- Imports
- Déstockage inter-saisonnier
- Déstockage STEP
- Déstockage court-terme

Stockage de court-terme et de STEP

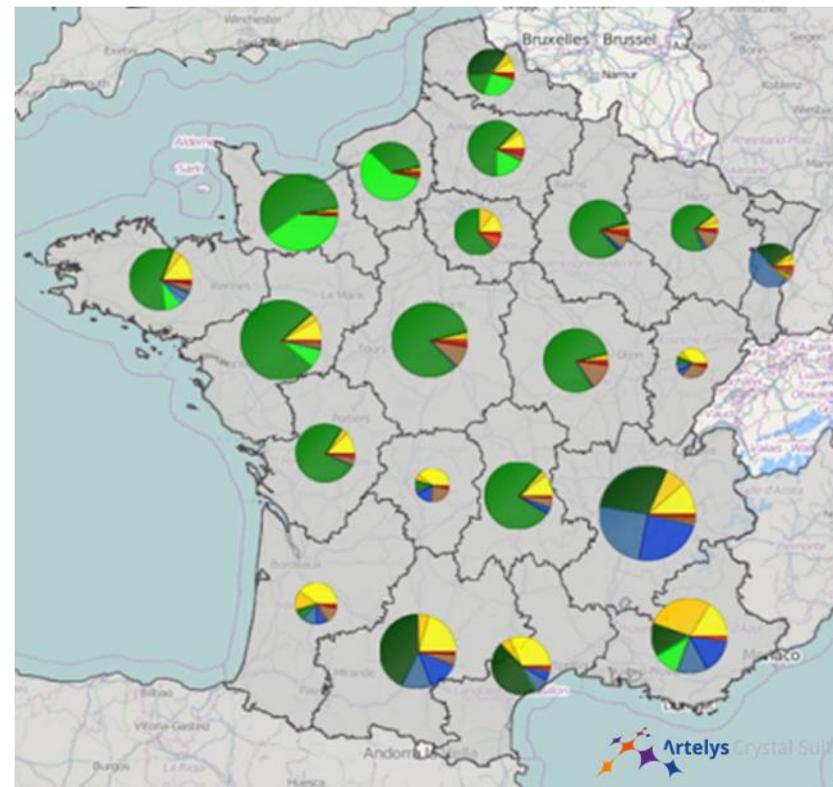
Reports suite aux effacements

Consommation pilotable coïncidant avec la production PV



- Consommation non pilotable
- Consommation effaçable non effacée
- Consommation pilotée quotidiennement
- Reports de consommation effacée
- Demande
- Exports
- Stockage inter-saisonnier
- Stockage STEP
- Stockage court-terme

- L'optimum économique ne dépend pas que du coût des technologies, mais également du service rendu au système
  - L'énergie la moins chère n'est pas la même selon les régions
  - Le système tend à privilégier les profils les plus réguliers, même pour un léger surcoût
    - Saturation des gisements biomasse
    - Exemple de l'éolien en mer posé en PACA
  - Même si prédominance de l'éolien, chaque filière apporte de la valeur au système
    - Surcoût de remplacement de l'énergie PV: +24€/MWh



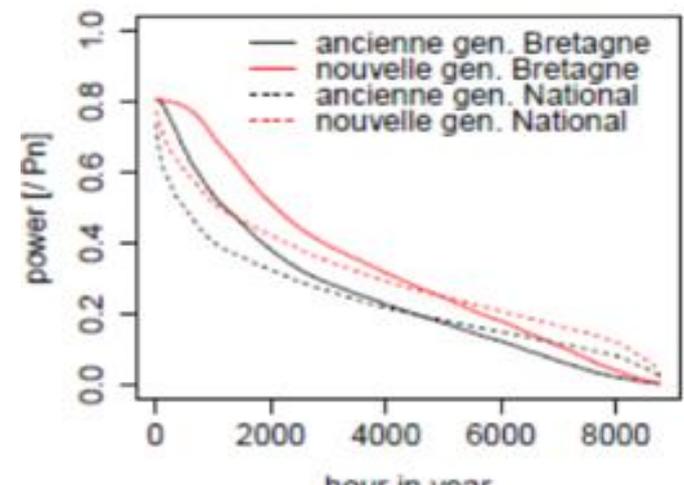
## 75% du parc éolien terrestre est de technologie « nouvelle génération »

- Plus grande pales, plus hautes
- Captent des vents plus faibles
- Atteignent plus vite leur puissance nominale
- Un profil de production plus « system-friendly » (moins de variabilité)



Eolienne  
 standard  
 (2,5m<sup>2</sup>/kW)

Eolienne toilée  
 (6m<sup>2</sup>/kW)



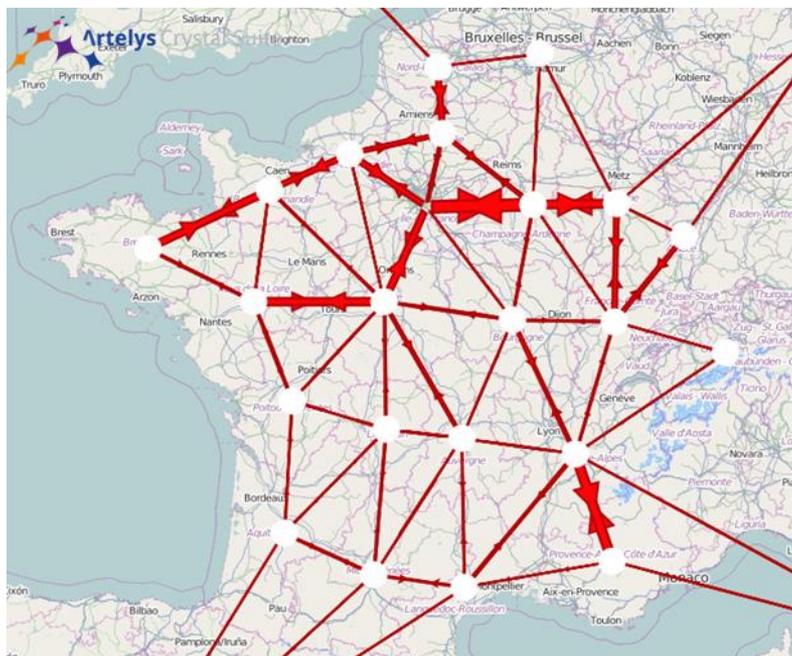
**Résultat 5**

**Le réseau permet de mutualiser les potentiels**

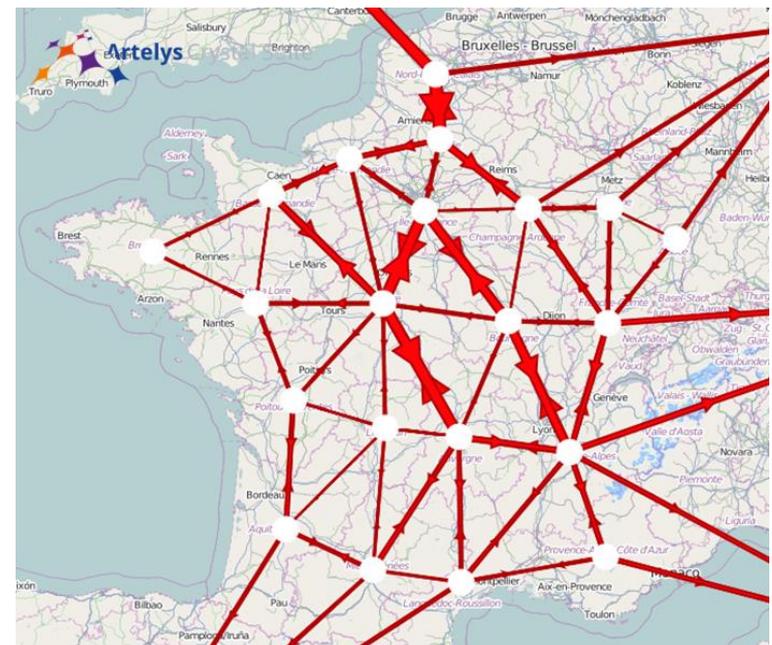
**Le développement du réseau est nécessaire et permet de mutualiser les potentiels**

- Le réseau de grand transport augmente de 36% par rapport à l'optimum de parc actuel : 68 GW de capacités interrégionales, contre 50 GW actuellement
- 23 GW d'exports et 16 GW d'imports avec l'étranger

Réseau inter-régional 2013 « adapté »



Réseau inter-régional 2050



- **Principaux éclairages, à ce jour:**
  - Importance de la MDE/MDP pour accompagner une politique de développement des EnR
  - Importance de la R&D et de l'accompagnement pour la baisse des coûts des technologies
  - Impact fort de l'acceptabilité sociale des EnR
  - Importance de soumettre les EnR au « signal prix » pour favoriser les technologies ayant les meilleurs profils pour le système
- **Plusieurs variantes ou approfondissements à étudier:**
  - Etude « Autonomie énergétique des Zones non interconnectées »
  - Evaluation de l'impact macro-économique
  - Meilleure prise en compte des surcoûts du réseau électrique, notamment de distribution
  - Prise en compte de la dynamique infra-horaire
  - ACV du mix électrique...

### 1. Continuer à accompagner la baisse des coûts

Financement de l'innovation pour préfigurer les solutions industrielles de demain

### 2. L'intégration réseau et environnementale des EnR

Etudes techniques, analyses de cycle de vie

### 3. La structuration des filières professionnelles

Formation / Animation / connaissance des emplois

### 4. La pédagogie / l'accompagnement du public

Information du public, EIE



**Sabella - D10**



**ECare - CNIM**



**VERTIWIND**



**OCEADE - ALSTOM**



**Trackers**



**Haliade 150 ALSTOM  
OFFSHORE FRANCE**

# Merci de votre attention

Contact: [David.Marchal@ademe.fr](mailto:David.Marchal@ademe.fr)

Tous les résultats sur:  

<http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

Le détail des chroniques horaires:  

<http://mixenr.ademe.fr>

